

Werkstoffe als Schutz vor Laserbeschuss

Martin Frieß, Bernd Mainzer, Carsten Pargmann*, Jürgen Handke*

DLR Stuttgart, Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie,
Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart

*Institut für Technische Physik, Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart

DWT-Tagung 2016, Bonn, 23.-25.02.2016



Wissen für Morgen



Überblick

- Einleitung und Motivation
- Herstellung und Einsatz von C/C-SiC-Werkstoffen
- Versuchsaufbau Laserbeschuss
- Erste Ergebnisse von C/C-SiC durch Laserbeschuss
- Vergleich mit konventionellen und alternativen Schutz-Werkstoffen
- Energetische Betrachtungen
- Mikrostrukturelle Untersuchungen an C/C-SiC und CFK
- Zusammenfassung
- Ausblick



Motivation I

- Konventionelle zivile Laserschutzsysteme basieren z.B. auf doppelwandigen Systemen mit einer automatischen Abschaltung beim Durchschuss der ersten Wand:
 - Guter Schutz bei moderaten Laserleistungen (Industrieeinsatz)
 - Bedingter Schutz vor Hochenergielasern (Durchbrand vor Shut-down)
 - Schutz vor Laserbeschuss im militärischen Einsatz nicht möglich!
- Refraktärmetalle (Zr, Hf, Mo, W, Nb, Ta, Re und Ir) sind:
 - Materialien mit extrem hohen Schmelzpunkten ($>2000^{\circ}\text{C}$, W: 3422°C) und können Wärmeenergie durch Strahlung abgeben
 - extrem schwer: Dichte ca. 20 g/cm^3 (Wolfram)
 - oxidativ anfällig bei längerem Laserbeschuss

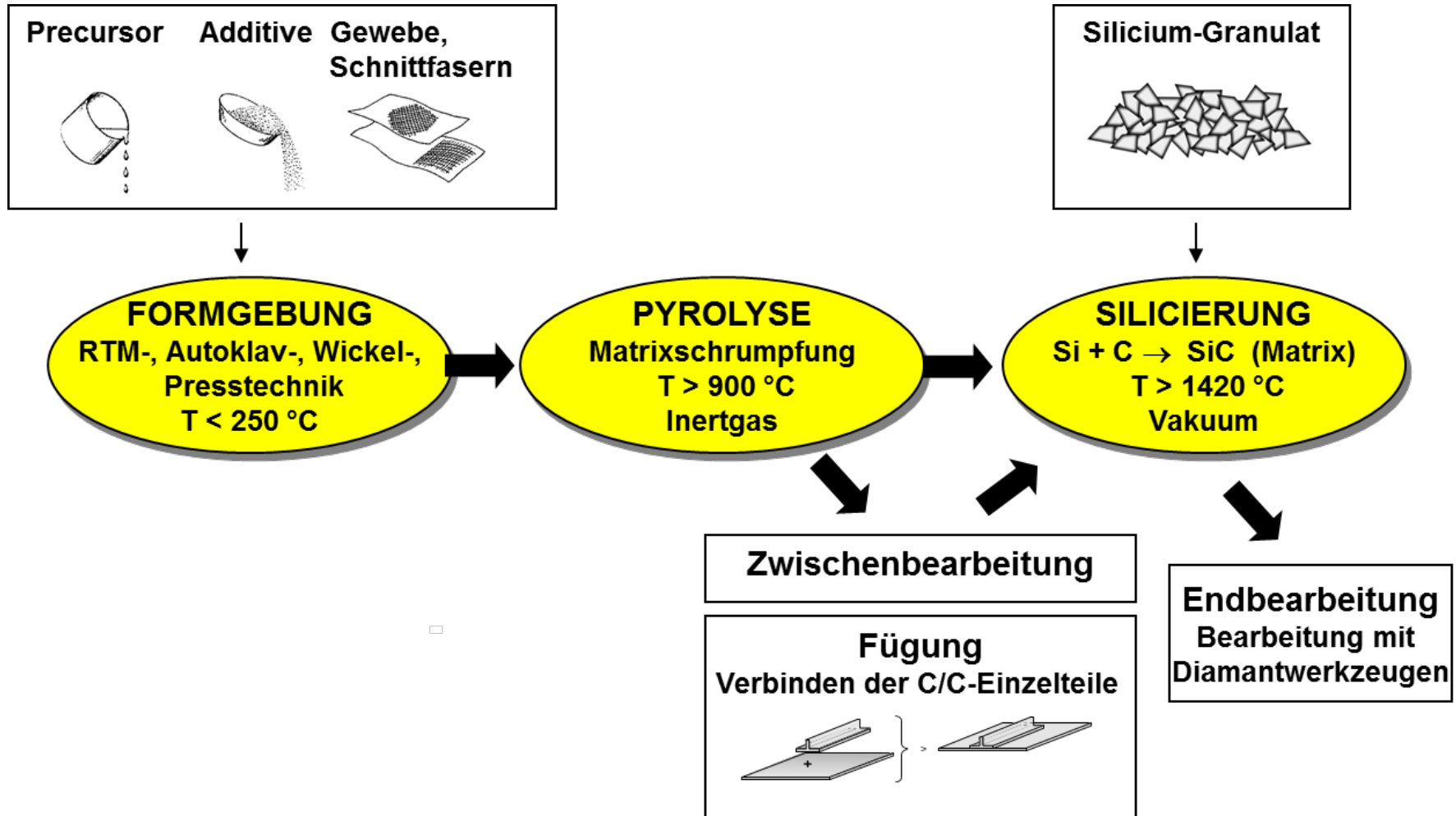


Motivation II

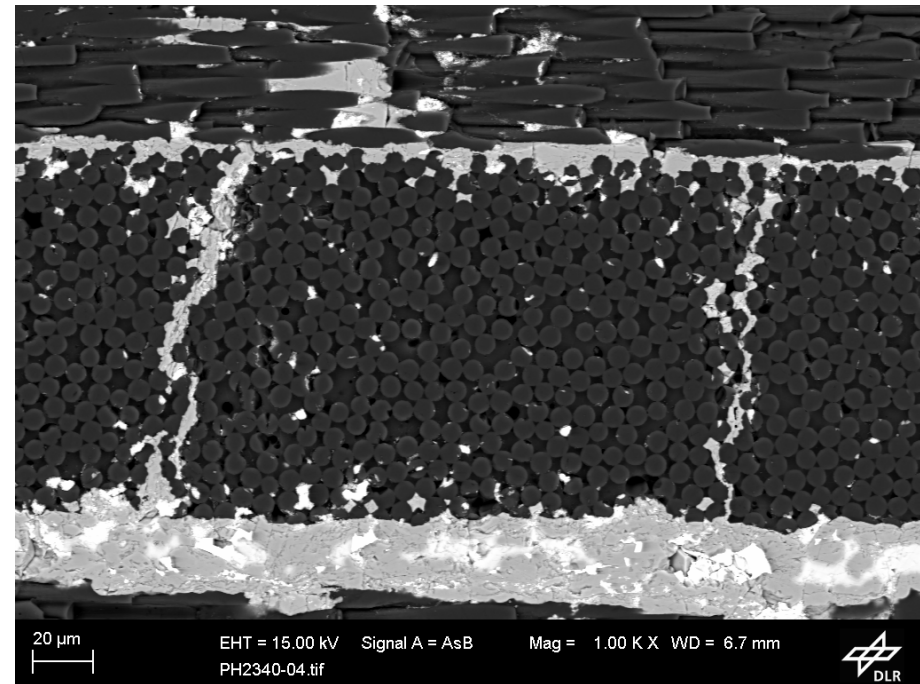
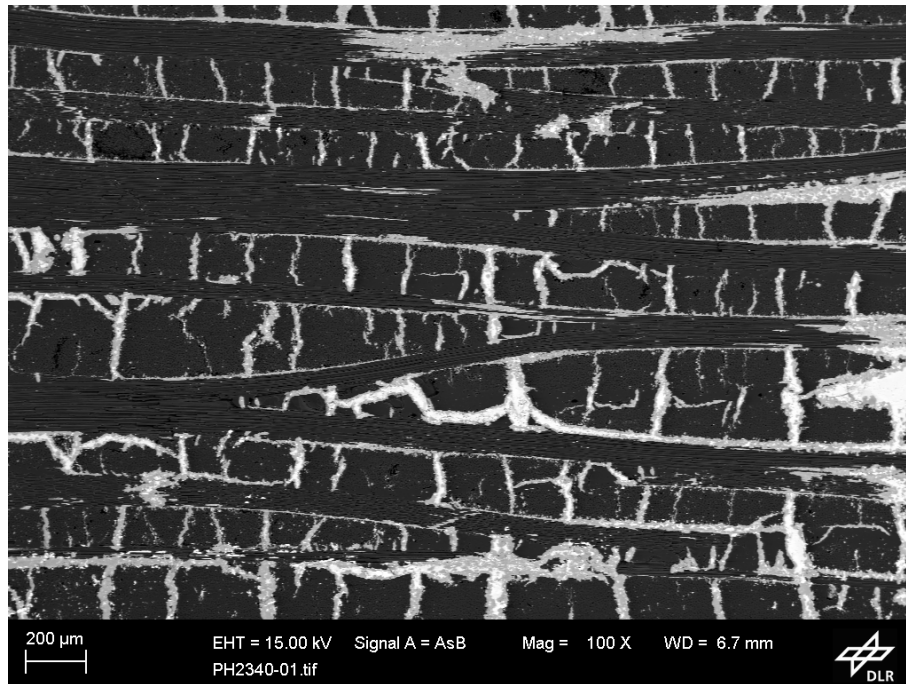
- alternative CMC-Werkstoffe auf der Basis von C/C-SiC sind:
 - Materialien mit extrem hohen Zersetzungspunkt ($>2800^{\circ}\text{C}$) können Wärmeenergie durch Strahlung abgeben
 - extrem leicht: Dichte ca. 2 g/cm^3 (C/C-SiC)
 - oxidativ weniger anfällig durch mögliche Passivierung (tbc)
- Werkstoff- und Bauteilentwicklung für Laserschutz als Herausforderung:
 - Höchste thermische Belastung (Temperatur, Thermoschock, etc.)
 - Hohe thermomechanische Belastung der Strukturen
 - Leichtbau und Realisierung dünnwandiger Strukturen sehr erwünscht



Flüssigsilicierverfahren (Liquid Silicon Infiltration, LSI) I



Flüssigsilicierverfahren (Liquid Silicon Infiltration, LSI) II: Mikrostruktur (REM)



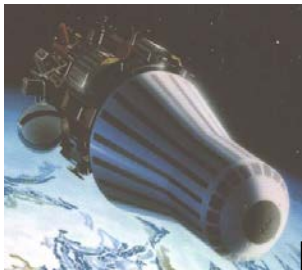
C/C-Blockstruktur mit SiC-Umhüllung für Oxidations- und Korrosionsschutz



C/C-SiC Thermalschutzstrukturen (TPS) für wiederverwendbare Raumfahrzeuge

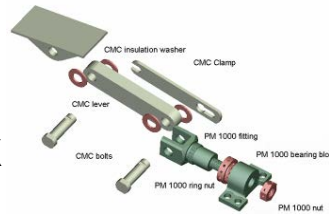
- Hochtemperatur-/Thermoschockbeständigkeit
- Leichtbaustrukturen
- Bauteilspezifisches Design auf Gewebe-Basis

EXPRESS-CETEX



- Gekrümmte Struktur
- Ø 300 mm, d=5 mm

X-38



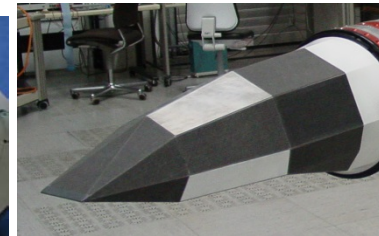
- Nase für ISS-Rescue Vehicle
- Ø 700 mm, h=190 mm
- d=6 mm

Foton-M2



- Segmentierte Struktur
- Ø 300 mm
- d =3 mm
- Flug 2005

Shefex I



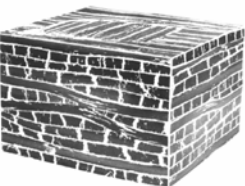
- Facetten-Kontur
- Ø 370 x 800 mm
- d =3 mm
- $T_{\max} \sim 1500^\circ\text{C}$ Mach 6
- Hohe aerodynamische Güte
- Low-cost-Ansatz
- Flug 2005

Shefex II



- Facetten-Kontur
- Ø 500 x 1500 mm
- d =3 mm
- $T_{\max} \sim 1800^\circ\text{C}$ Mach 10
- gesteuert
- Hohe aerodynamische Güte
- Low-cost-Ansatz
- Flug 2012

Werkstoff-entwicklung



1988

1995

2002

2005

2012

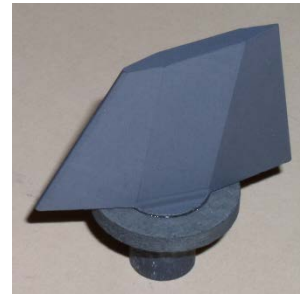


C/C-SiC Komponenten für Raketenmotoren

- Hochtemperatur- /Thermoschockbeständigkeit
- Leichtbaustrukturen
- Bauteilspezifisches Design auf Gewebe-Basis, Wickel- und Flechttechnik
- Hohe Abrasions-/Erosionsbeständigkeit
- Kostengünstige Fertigung

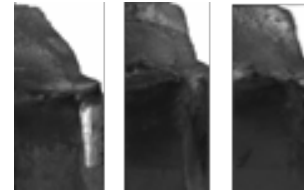


Schubkammern, ...
(120mm * 400 mm),
Düsenerweiterungen



Strahlruder
Serienproduk-
tion (NAMMO)

Neue Entwicklungen



Entwicklungs-
projekte

Reale Bauteiltests im Einsatz

Bedarfsorientierte Entwicklung von Werkst., Verf. und Bauteilen

Strahlruder
Screening-Test

Erster Düsentest

Grundlagenorientierte Entwicklung von Werkstoffen, Verfahren- und Bauteilen

1990

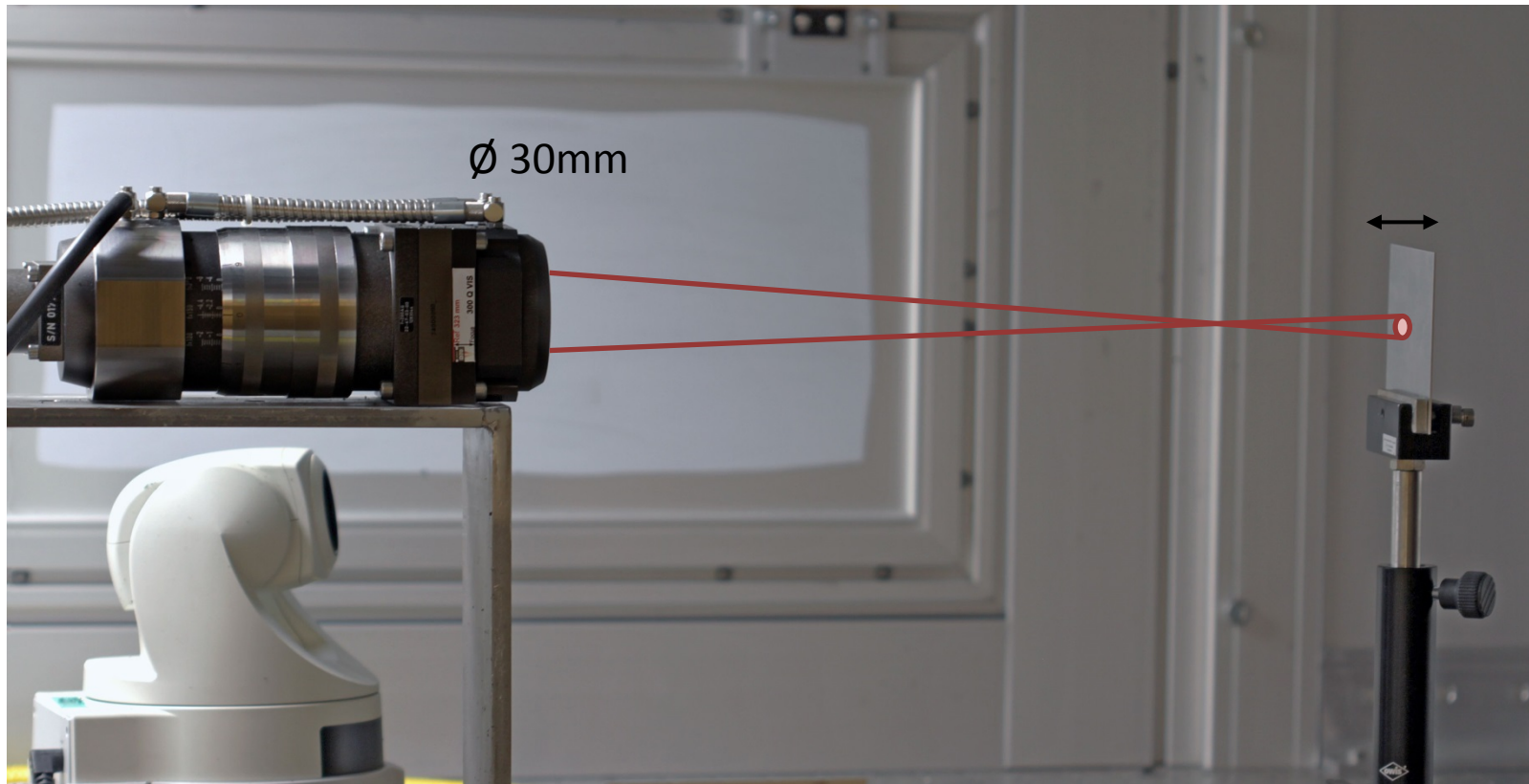
1995

2006

2011



Versuchsaufbau Laserbeschuss



- Scheibenlaser mit 2 Kavitäten
- Ausgangsleistung: 180 W - 6000 W
- Strahlqualität: 4 mm mrad
- Faserdurchmesser: 100 μm
- Numerische Apertur: 0.1
- Wellenlänge: 1030 nm

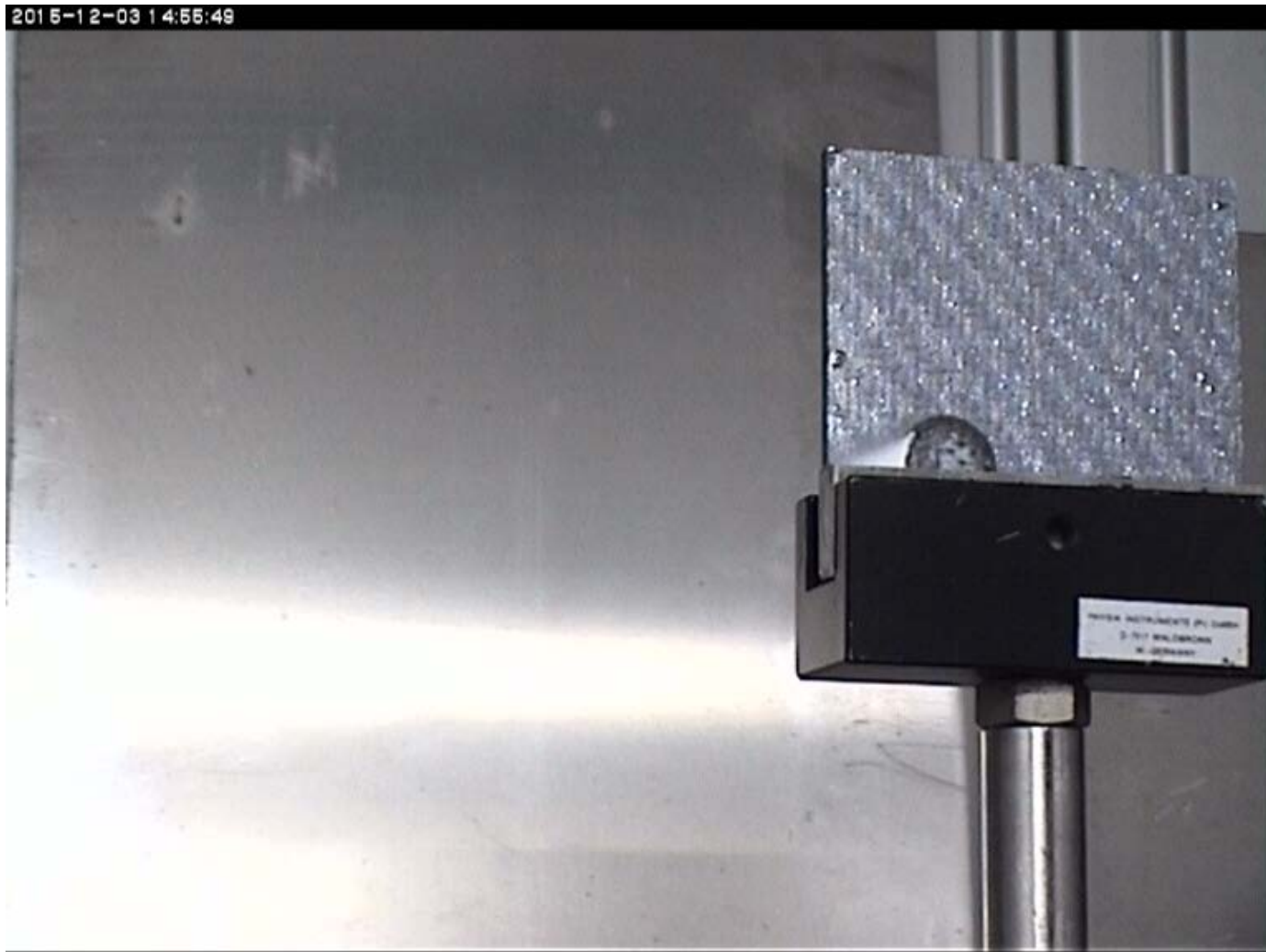


Laserbeaufschlagung von C/C-SiC am Bsp. der Probe PH2340_3 (Wandstärke 3 mm)

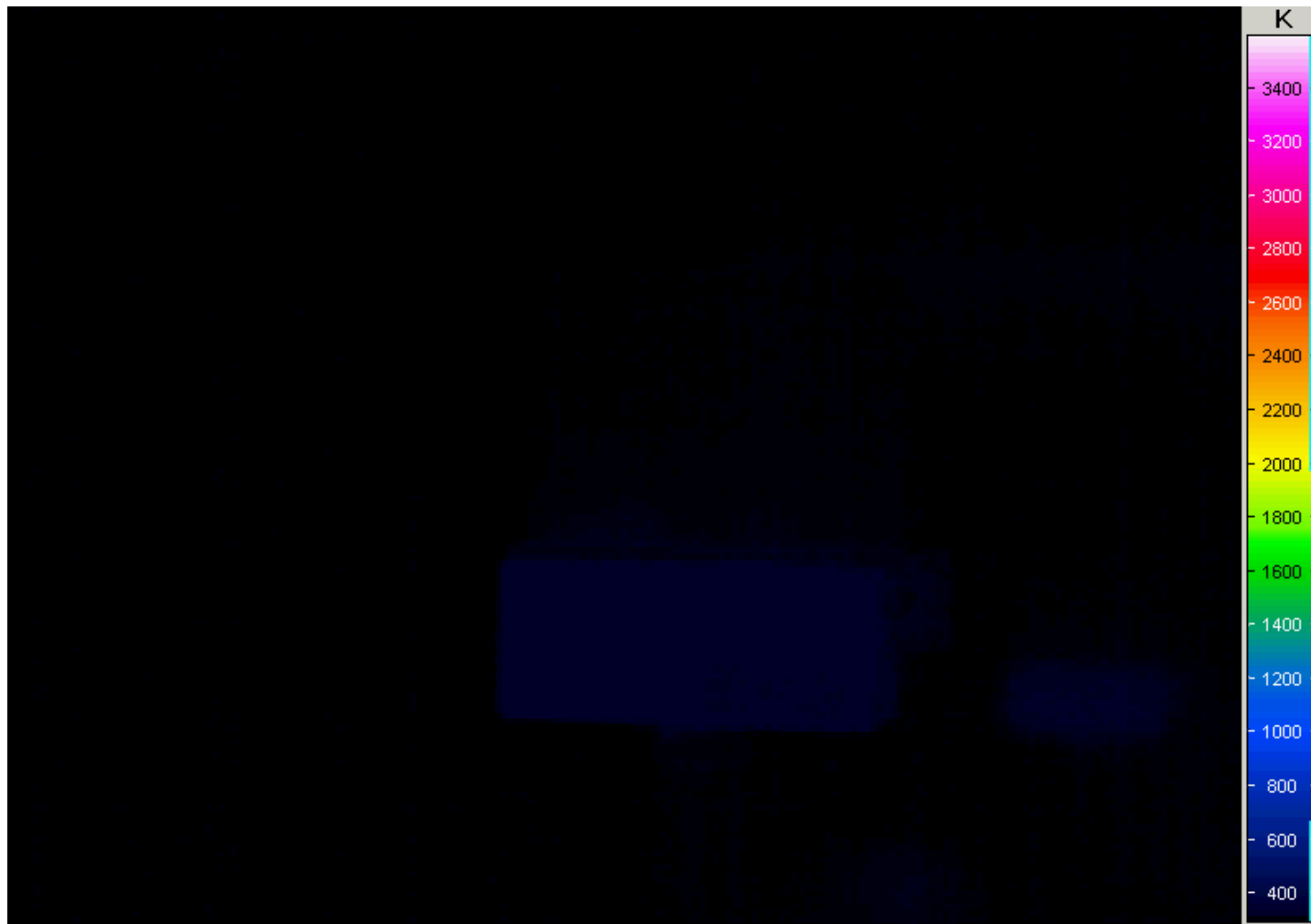
Versuchsbedingungen:

- Laserleistung 2 kW,
- Wellenlänge 1030 nm,
- Beaufschlagungsdauer maximal 30 s,
- Beaufschlagungsfläche 0,785 cm²,
- Leistungsdichte 2,55 kW/cm²

Probe PH2340_3: 2 kW auf 0,785 cm²



Probe PH2340_3: 2 kW auf 0,785 cm² (IR-Kamera)



Laserbeaufschlagung von konventionellen und alternativen Schutzwerkstoffen

Versuchsbedingungen:

- Laserleistung 1 - 5 kW,
- Wellenlänge 1030 nm,
- Beaufschlagungsdauer maximal 30 s,
- Beaufschlagungsfläche 0,785 cm²,
- Leistungsdichte 1,27 – 6,37 kW/cm²

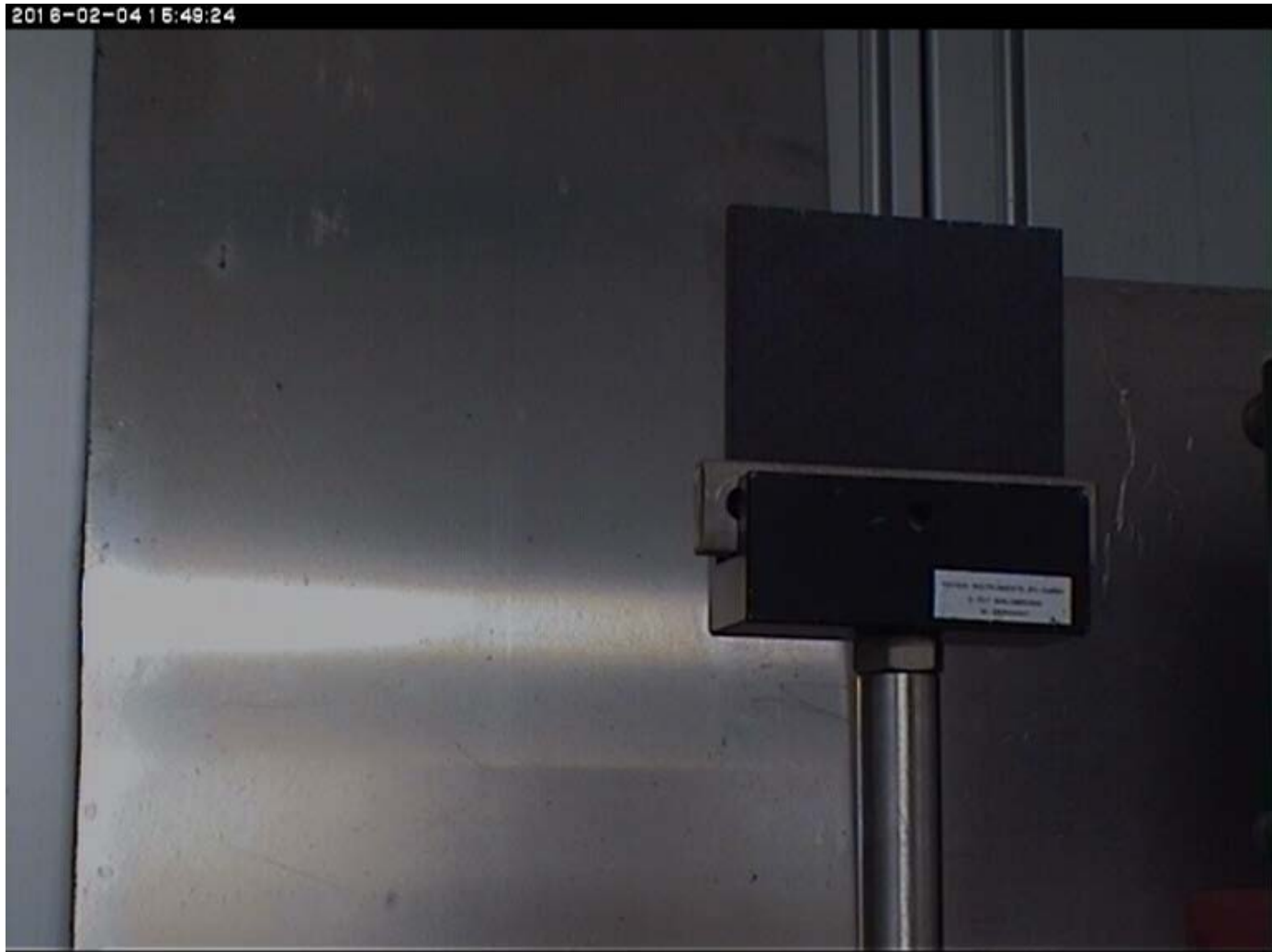
Laserbeaufschlagung von Stahl (VA) mit 1 kW



Laserbeaufschlagung von Al mit 3 kW



Laserbeaufschlagung von CFK (Phenolharz) mit 1 kW



Laserbeschuss: 1 - 5 kW auf 0,785 cm²

Beschussschema

1 kW

2 kW

5 kW

3 kW

Aluminium
Smp. 660°C,
 $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$

n.b.

n.b.: nicht bestimmt

CFK
Phenolharz-
Matrix
Zers. >250°C
 $\rho = 1,4 \text{ g/cm}^3$

Stahl VA
1.4301
Smp. 1536°C
(Fe)
 $\rho = 7,8 \text{ g/cm}^3$

Wolfram
Smp. 3422°C
Gelb: WO₃
(XRD)
 $\rho = 19,3 \text{ g/cm}^3$

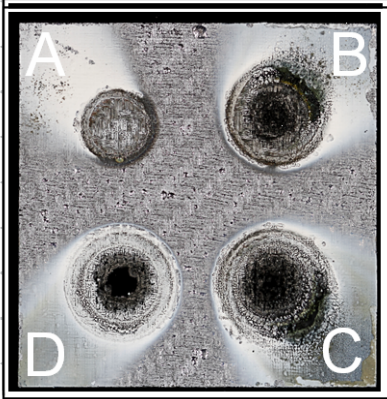
→ verschiedene Phänomene zur Schutzwirkung sind noch nicht verstanden
→ **Forschungsbedarf!**

Laserbeaufschlagung von C/C-SiC

Versuchsbedingungen:

- Laserleistung 1 - 5 kW,
- Wellenlänge 1030 nm,
- Beaufschlagungsdauer maximal 30 s,
- Beaufschlagungsfläche 0,785 cm²,
- Leistungsdichte 1,27 – 6,37 kW/cm²

C/C-SiC-Proben, Versuchsbedingungen und -ergebnisse

	Leistung [kW]	Fläche [cm ²]	Leistungsdichte [kW/cm ²]	Durchbruchzeit [s]	Bild
Probe PH2340_3					
A	1	0,785	1,27	>30	
B	2	0,785	2,55	>30	
C	3	0,785	3,82	15,28	
D	5	0,785	6,37	5,16	

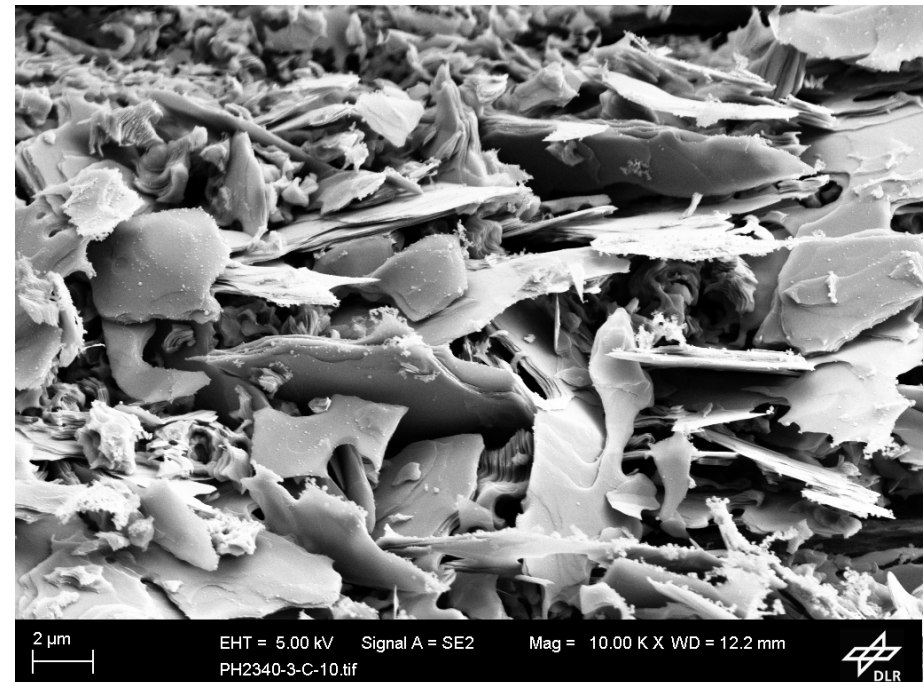
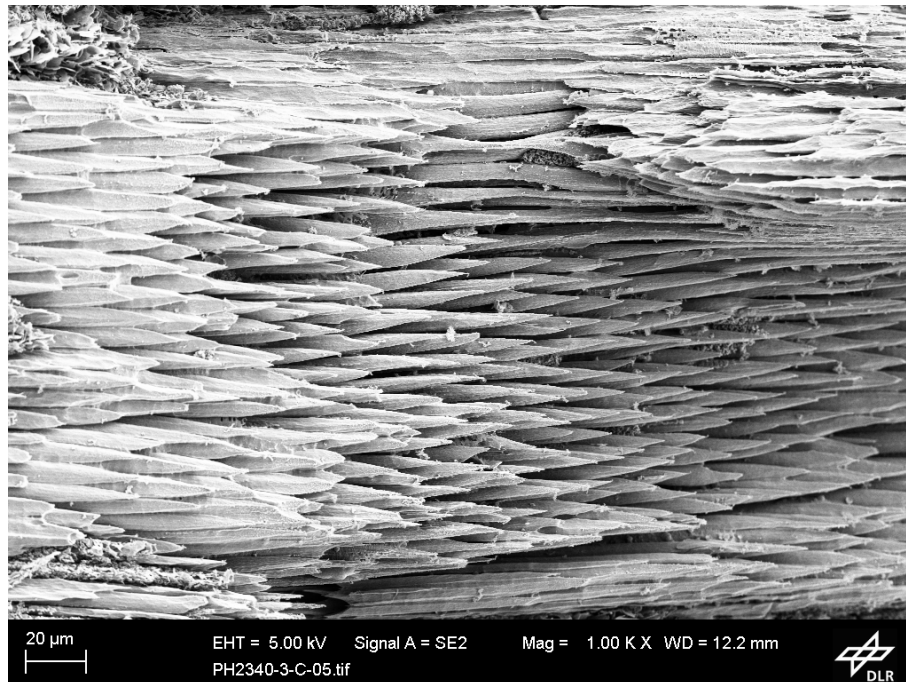


Mikrostrukturuntersuchungen an mit Laser beaufschlagten Proben aus C/C-SiC

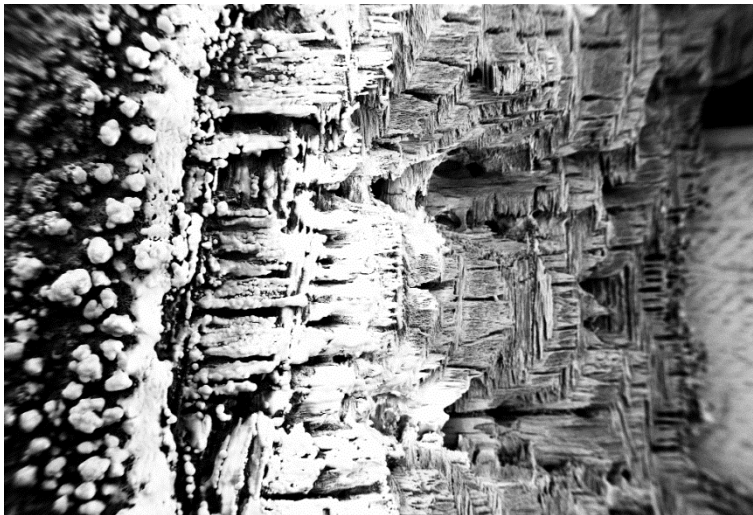
- **Mikrostrukturuntersuchungen via REM und EDX**
- **Berechnung des Energieeintrags**
- **Erste Erklärungsversuche zu ablaufenden Reaktionsmechanismen**



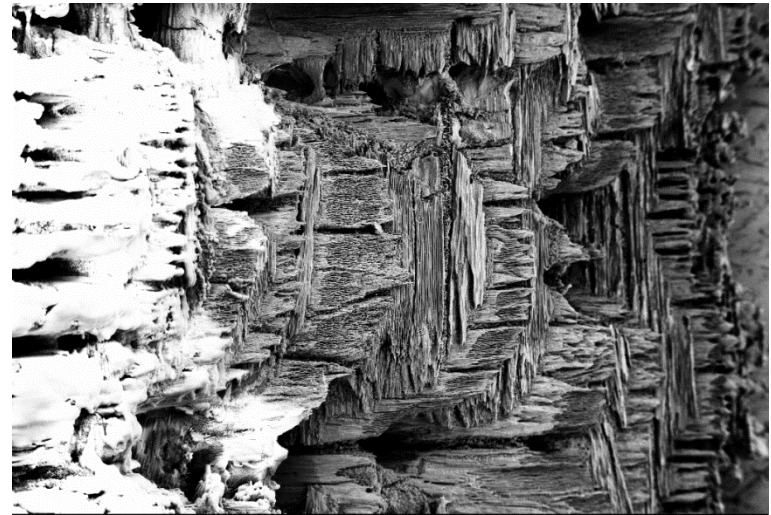
C/C-SiC (XS): 3 kW auf 0,785 cm² für 15 s



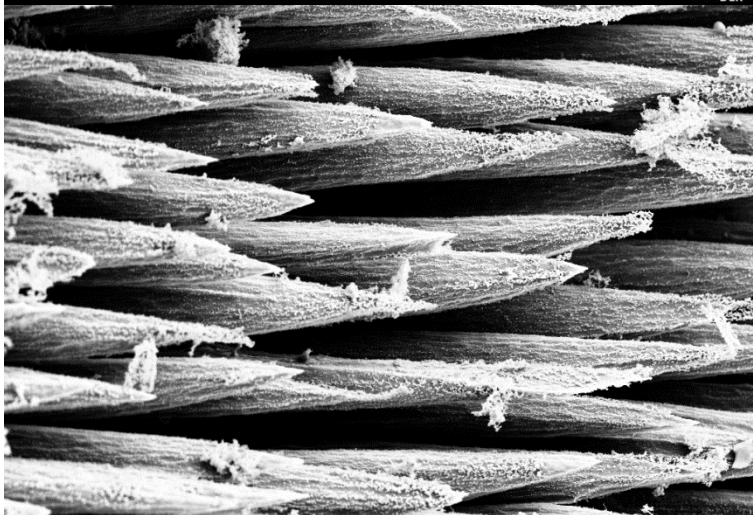
C/C-SiC (XS): 5 kW auf 0,785 cm² für 5 s



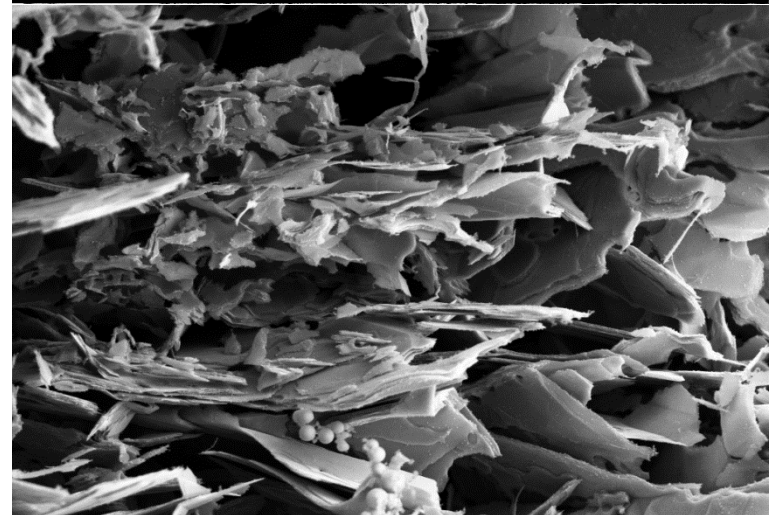
1 mm EHT = 5.00 kV Signal A = SE2 Mag = 54 X WD = 12.5 mm
PH2340-3-D-01.tif



200 µm EHT = 5.00 kV Signal A = SE2 Mag = 100 X WD = 13.5 mm
PH2340-3-D-02.tif



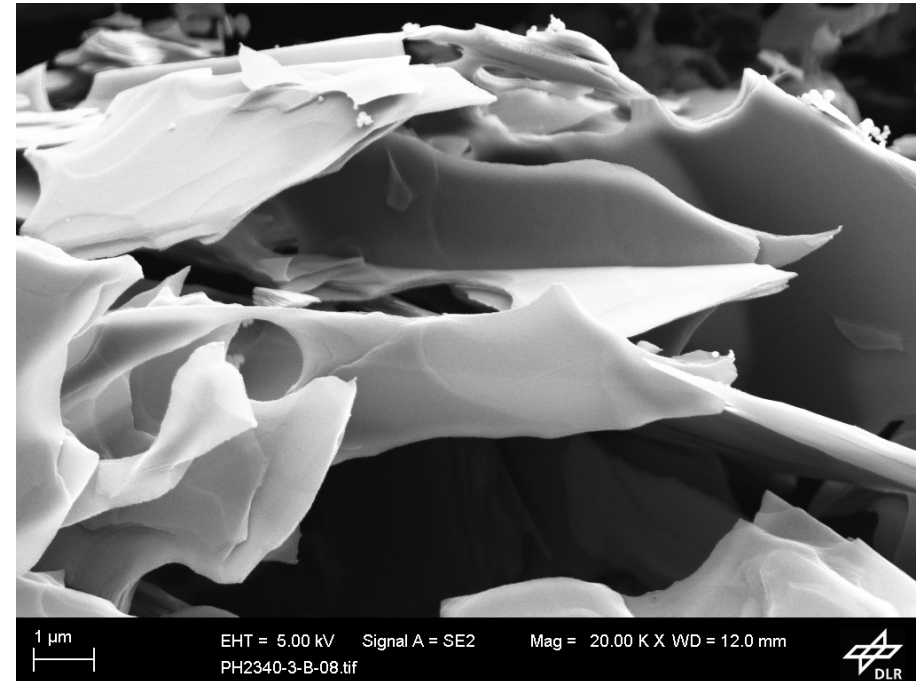
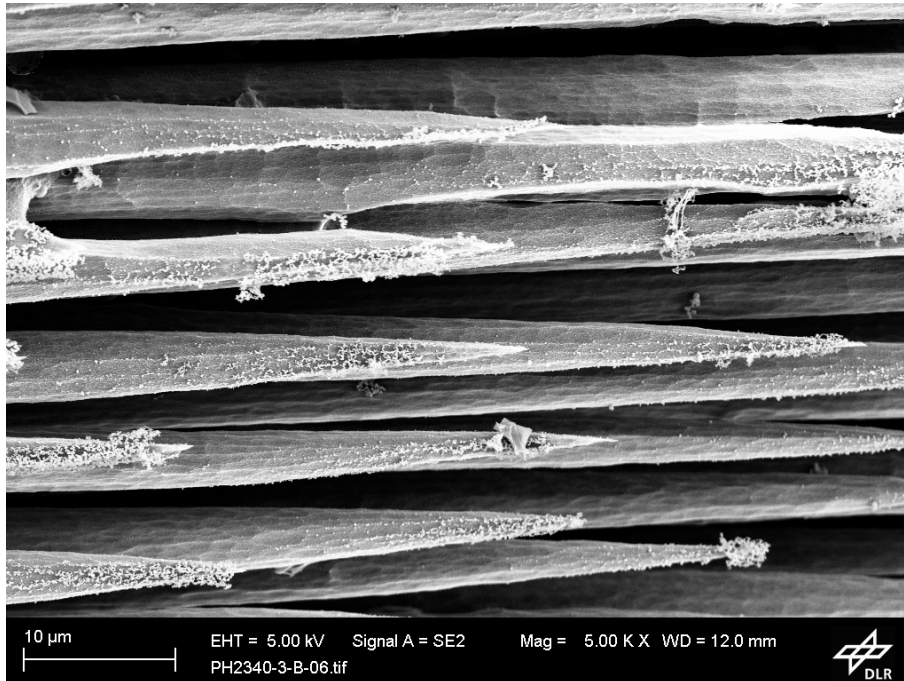
10 µm EHT = 5.00 kV Signal A = SE2 Mag = 5.00 K X WD = 13.4 mm
PH2340-3-D-06.tif



2 µm EHT = 5.00 kV Signal A = SE2 Mag = 10.00 K X WD = 13.4 mm
PH2340-3-D-09.tif



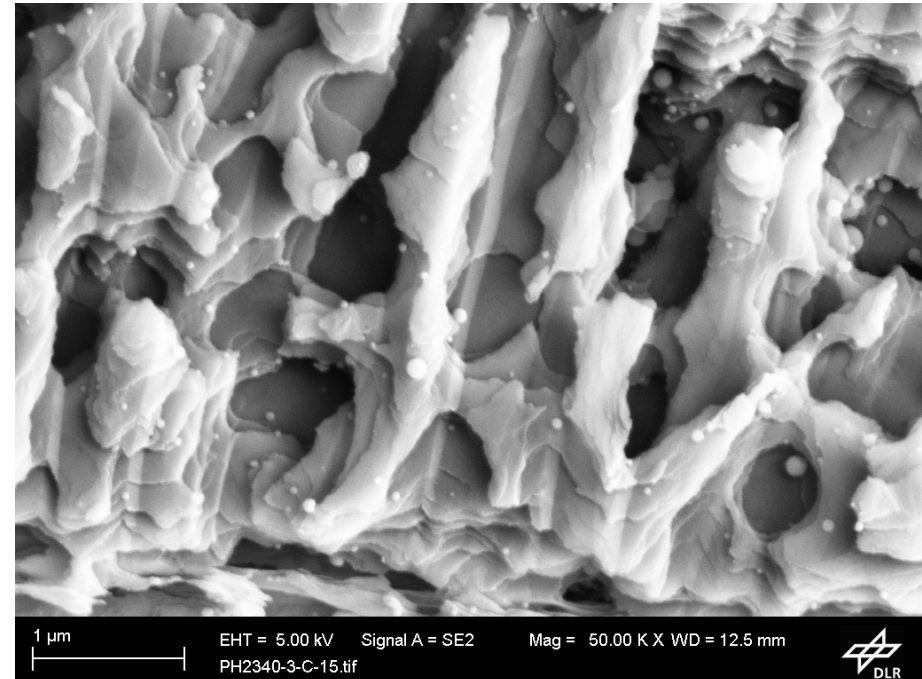
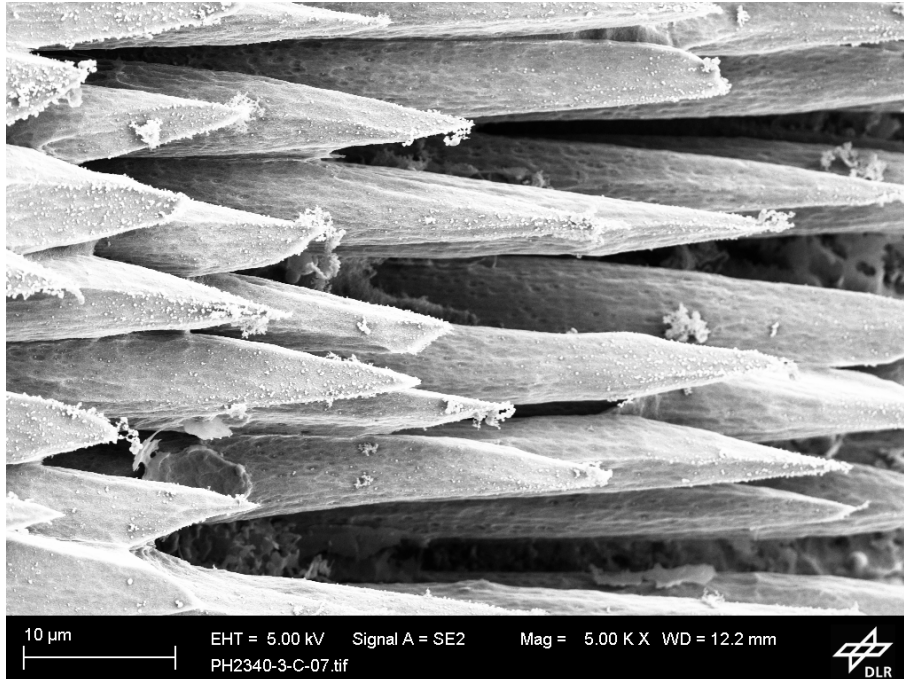
Laserbeschuss von C/C-SiC (XS) mit 2 kW



→ Erzeugung von Kohlenstoffnanostrukturen (Graphen)



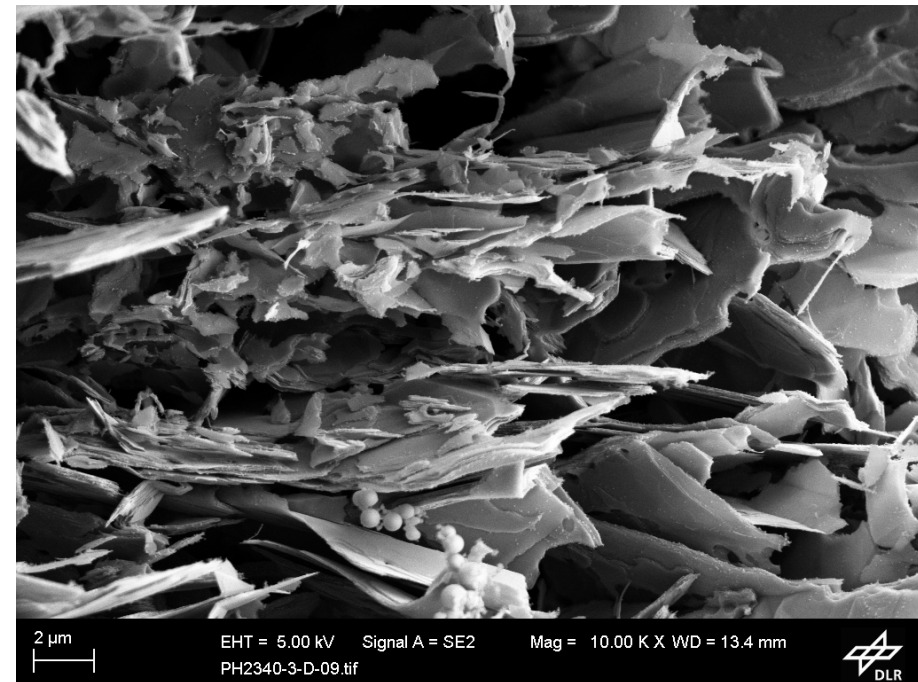
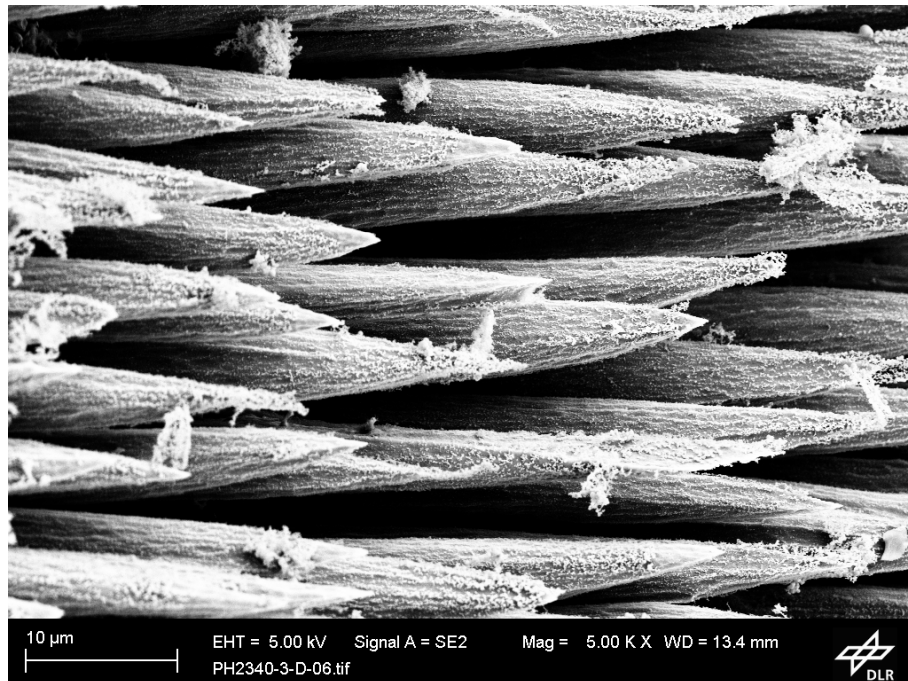
Laserbeschuss von C/C-SiC (XS) mit 3 kW



→ Erzeugung von Kohlenstoffnanostrukturen (Graphen)

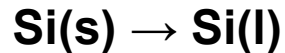


Laserbeschuss von C/C-SiC (XS) mit 5 kW

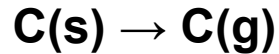


→ Erzeugung von Kohlenstoffnanostrukturen (Graphen)

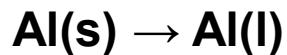
Energetische Betrachtungen möglicher Reaktionen



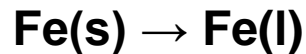
$$\Delta H = 50 \text{ kJ/mol}$$



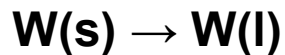
$$\Delta H = 715 \text{ kJ/mol}$$



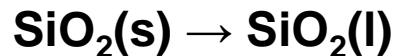
$$\Delta H = 11 \text{ kJ/mol}$$



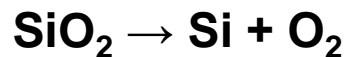
$$\Delta H = 14 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta H = 35 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta H = 8 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta H = 911 \text{ kJ/mol}$$



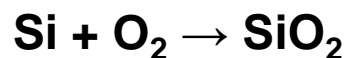
$$\Delta H = 72 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta H = -142 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta H = -697 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta H = -911 \text{ kJ/mol}$$

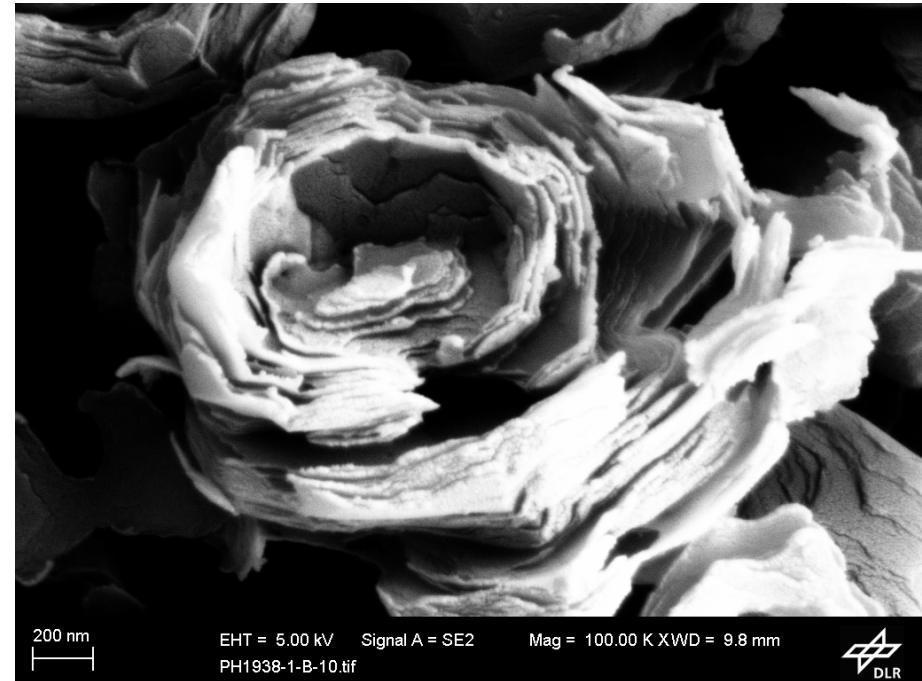
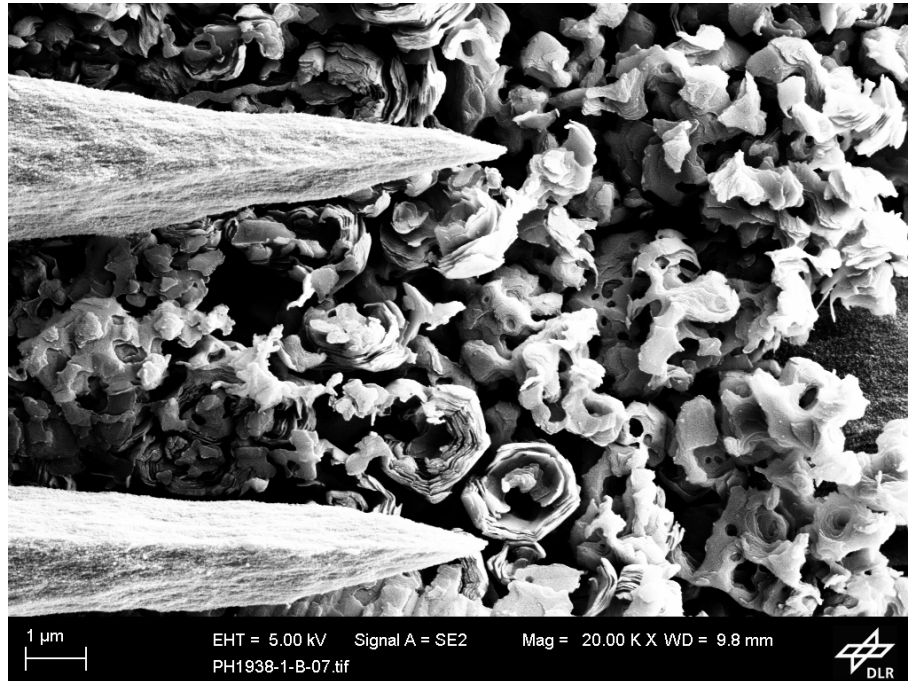


Laserbeaufschlagung von CFK

Versuchsbedingungen:

- Laserleistung 1 - 5 kW,
- Wellenlänge 1030 nm,
- Beaufschlagungsdauer maximal 30 s,
- Beaufschlagungsfläche 0,785 cm²,
- Leistungsdichte 1,27 – 6,37 kW/cm²

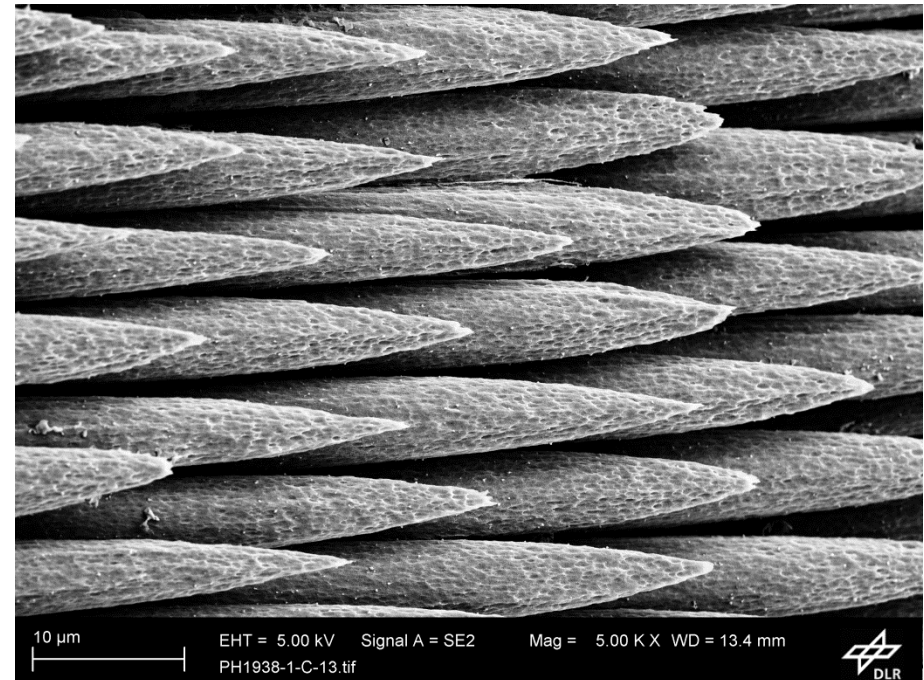
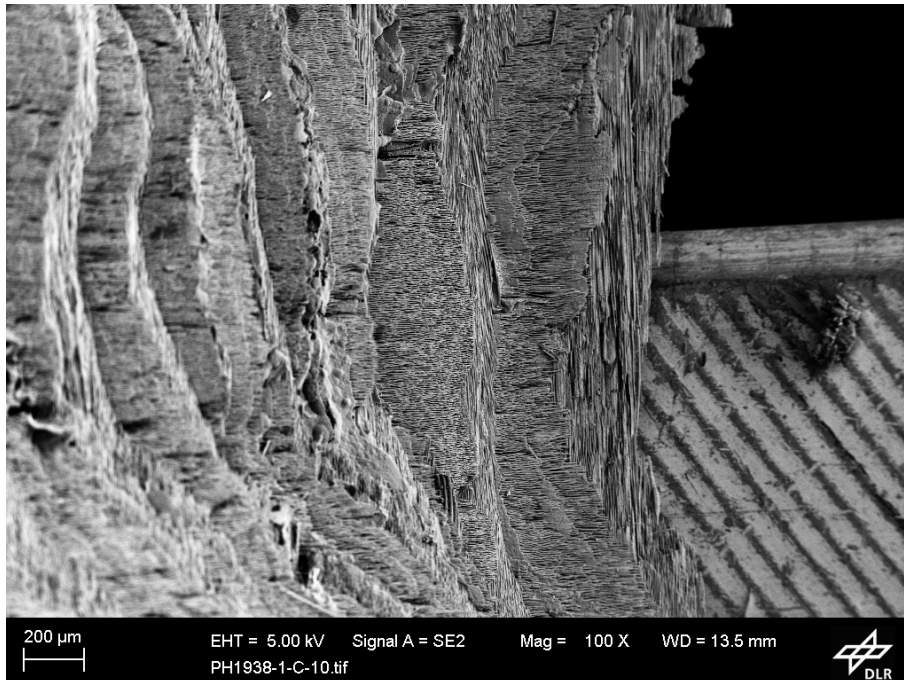
CFK-Probe 2 kW auf 0,785 cm²



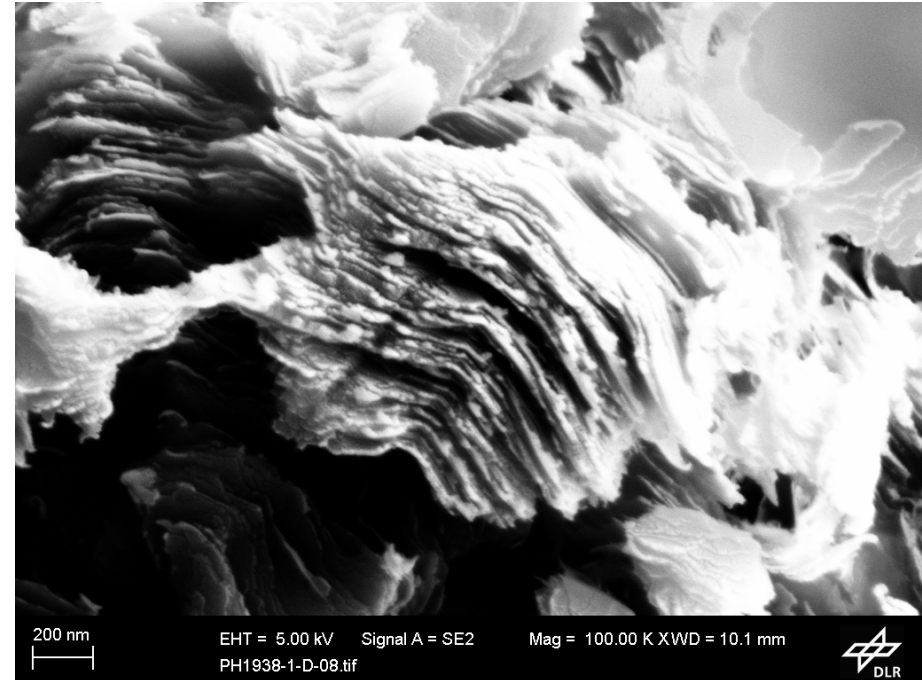
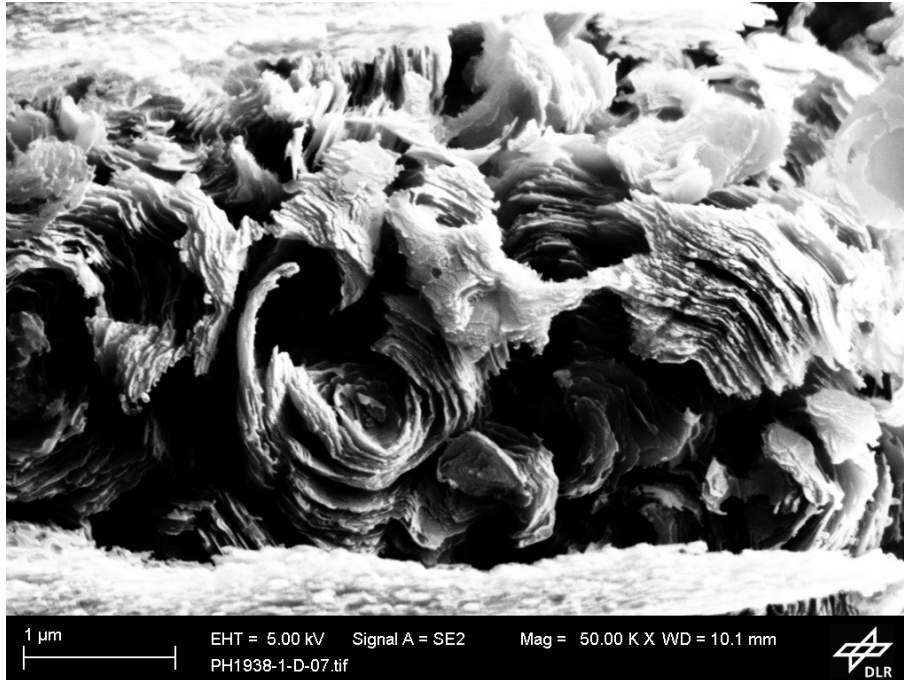
→ Erzeugung von Kohlenstoffnanostrukturen (Graphen und „onion-like carbon“)



CFK-Probe 3 kW auf 0,785 cm²



CFK-Probe 5 kW auf 0,785 cm²



→ Erzeugung von Kohlenstoffnanostrukturen (Graphen und „onion-like carbon“)

Zusammenfassung

- Laserbeschuss führt zu hohem Wärmeeintrag, günstige Eigenschaften sind:
 - Reflexion des Laserlichts zum Schutz vor Wärmeeintrag (Al)
 - Hoher Schmelzpunkt ($>2000^{\circ}\text{C}$) des Wandmaterials zur Energieaufnahme und Energiedissipation durch Strahlung (W)
 - Energiedissipation durch extrem energieverzehrende Umwandlungsprozesse (CFK)
- Der Energieeintrag ist durch Laserbeschuss so groß, dass sich SiC gemäß Thermodynamik in temporärem C und Si(g), das mit O_2 zu volatilem SiO reagiert und im Gasstrom verschwindet, umsetzt (C als Rest)
- Die Nebenreaktion von C mit O_2 ist offensichtlich gegenüber der von SiC mit O_2 kinetisch benachteiligt
- Kohlenstoff aus Matrix und C-Fasern wird aufgrund des intensiven Energieeintrags in neue C-Allotrope (Graphen?) umgewandelt



Ausblick

- Eine Verbesserung kann durch höher schmelzende Refraktärverbindungen als die der Zersetzungstemperatur von SiC (ca. 2800°C) erreicht werden
- Beispielhaft hierzu sind zu nennen Übergangsmetallcarbide von Ti, Zr, Hf, Re, Cr, Mo, W, V, Nb, Ta, sowie exotischen Varianten, wie ThC, etc.
- Vorteilhaft ist die Schmelzinfiltration mit eutektischen Mischungen unter Bildung von hochrefraktären Verbindungen zur Erzielung von dichten Werkstoffen
- Materialien auf der Basis von C/C-SiC und weiteren Refraktärmetallcarbiden bieten einen guten Schutz vor Laserbeschuss insbesondere unter Leichtbauaspekten

